

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

---

**Fakulta strojní**



**Metalurgické zásady výroby odlitků z litiny s  
kuličkovým grafitem s vysokým obsahem  
křemíku**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2006**

**Pavel Tvrzník**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie  
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie

### **Metalurgické zásady výroby odlitků z litiny s kuličkovým grafitem s vysokým obsahem křemíku**

### **Metallurgical fundamentals of foundry production of high silicon content spheroidal graphite cast iron castings.**

Pavel Tvrzník

**KSP – B12**

Vedoucí diplomové práce:  
Konzultant diplomové práce:

Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – *TU v Liberci*  
Ing. Jan Šmrha – *TU v Liberci*

#### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran	45
Počet tabulek	9
Počet příloh	- -
Počet obrázků	14

26. 5. 2006

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: B2341 - Strojírenství  
Bakalář: Pavel Tvrzník  
Téma práce: Metalurgické zásady výroby odlitků z litiny s  
kuličkovým grafitem s vysokým obsahem křemíku

Metallurgical fundamentals of foundry production of high  
silicon content spheroidal graphite cast iron castings.

Číslo BP: KSP – B12  
Vedoucí BP: prof. Ing. Iva Nová, CSc. – *TU v Liberci*  
Konzultant: Ing. Jan Šmrha – *TU v Liberci*

**Abstrakt:** Bakalářská práce shrnuje předchozí poznatky o výrobě odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Dále se zabývá studiem vlivu technologických parametrů a chemického složení na mechanické vlastnosti zkušebních odlitků.

**Abstract:** The thesis summarizes previous knowledge about production of castings made of spheroidal graphite cast iron. Furthermore this thesis is engaged in studying of influence of technological parameters and chemical composition on mechanical properties of specimen castings.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Českém Dubu, 26. 5. 2006

.....  
Pavel Tvrzník  
Předměstí 100  
463 43 Český Dub

## P o d ě k o v á n í

Děkuji všem, kteří svou pomocí přispěli při vzniku této Bakalářské práce. Zejména prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a Ing. Janu Šmrhovi za vedení a odborné rady a připomínky. Dále panu Drahoslavu Vinšovi za praktickou pomoc při provádění experimentálních prací.

Největší dík patří mým rodičům za podporu během celého studia.

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE.....</b>	<b>10</b>
2.1 CHARAKTERISTIKA GRAFITICKÝCH LITIN .....	10
2.2 PŘEHLED VLASTNOSTÍ ZÁKLADNÍCH DRUHŮ GRAFITICKÝCH LITIN .....	12
2.2.1 Litina s lupínkovým grafitem (LLG).....	12
2.2.2 Litina s červíkovým grafitem (LČG) .....	12
2.2.3 Litina s kuličkovým grafitem (LKG).....	13
2.2.3.1 Mechanické vlastnosti LKG .....	13
2.2.3.2 Slévárenské vlastnosti LKG .....	15
2.3 VLIV PŘÍSADOVÝCH PRVKŮ NA VLASTNOSTI LKG .....	16
2.4 TAVENÍ LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM .....	19
2.4.1 Vsázkové suroviny.....	19
2.4.2 Předled tavicích agregátů .....	19
2.4.2.1 Kuplovna .....	20
2.4.2.2 Elektrické obloukové pece.....	20
2.4.2.3 Elektrické indukční pece.....	21
2.4.2.4 Rotační bubnové pece.....	21
2.5 KRYSTALIZACE LITIN.....	22
2.5.1 Nukleace zárodků.....	22
2.5.2 Růst fází.....	22
2.5.3 Vznik primárního austenitu. ....	23
2.5.4 Krystalizace eutektika .....	23
2.5.4.1 Nukleace grafitu .....	24
2.5.4.2 Růst eutektika s kuličkovým grafitem .....	25
2.6 MODIFIKACE A OČKOVÁNÍ.....	25
2.6.1 Modifikace Mg .....	25
2.6.2 Modifikace kovy vzácných zemin .....	26
2.6.3 Očkování.....	27
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....</b>	<b>28</b>
3.1 POPIS PŘÍPRAVY SLÉVÁRENSKÝCH FOREM.....	28
3.1.1 Odlitek pro zkoumání vhodné struktury LKG .....	28
3.2 PŘÍPRAVA TAVENINY LKG .....	31
3.2.1 Tavicí zařízení a vsázkový materiál .....	31
3.2.2 Vzorky pro stanovení mikrostruktury .....	32
3.2.3 Vzorky pro zjišťování chemického složení.....	33
3.3 VLASTNÍ PROVÁDĚNÍ EXPERIMENTU .....	34
3.3.1 Vedení taveb pro přípravu taveniny LKG.....	34
3.4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ .....	35
3.4.1 Měření tvrdosti odlitků.....	35
3.4.2 Stanovení chemického složení jednotlivých taveb LKG .....	37
3.4.3 Stanovení mikrostruktury .....	37
<b>4. DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>41</b>
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>45</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

A	- tažnost [%]
C-MM	- modifikační činidlo Cer-Mischmetall
E	- Youngův modul pružnosti [MPa]
HB	- tvrdost dle Brinella
KVZ	- kovy vzácných zemin
LČG	- litina s červíkoým grafitem
LKG	- litina s kuličkovým grafitem
LLG	- litina s lupínkovým grafitem
TL	- temperovaná litina
$R_e$	- mez kluzu v tahu [MPa]
$R_m$	- mez pevnosti v tahu [MPa]
$R_{mo}$	- mez pevnosti v ohybu [MPa]
$\rho$	- hustota, měrná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
s	- směrodatná odchylka
Sc	- stupeň eutektičnosti
$\sigma_c$	-mez únavy [MPa]
v	- variační koeficient
x	- výběrový (aritmetický) průměr

## 1. ÚVOD

Železo je jedním z nejvíce se vyskytujících kovových materiálů na naší Zemi. V technické praxi mají značný význam slitiny železa s uhlíkem. K těmto slitinám se řadí grafitické litiny, které mají značné uplatnění při výrobě dílů automobilového průmyslu. Tento průmysl si žádá odlitky s lepšími mechanickými vlastnostmi získanými právě již po odlití. Je to z toho důvodu, že se konstruuje výkonnější automobily s menší hmotností.

Proto lze z dlouhodobého hlediska vysledovat procentuální úbytek produkce odlitků z litiny s lupínkovým grafitem (LLG), temperované litiny (TL) a především oceli na odlitky na úkor odlitků z litiny s kuličkovým grafitem (LKG) a slitin lehkých kovů. Jak je zřejmé ze statistiky výroby odlitků, poptávka odběratelů po odlitcích z LKG neustále roste a tím rostou též nároky na jejich kvalitu.

V tomto smyslu je též prováděn výzkum s výrobou odlitků na Katedře strojírenské technologie, oddělení strojírenské metalurgie, Technické univerzity v Liberci, který je prováděn v rámci řešení Výzkumného záměru MSM 4674788501.

Součástí řešení této problematiky je též úkol při řešení mé bakalářské práce, které se týká metalurgie LKG s vyšším obsahem křemíku pro výrobu odlitků s různou tloušťkou stěny.



## 2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

### 2.1 CHARAKTERISTIKA GRAFITICKÝCH LITIN

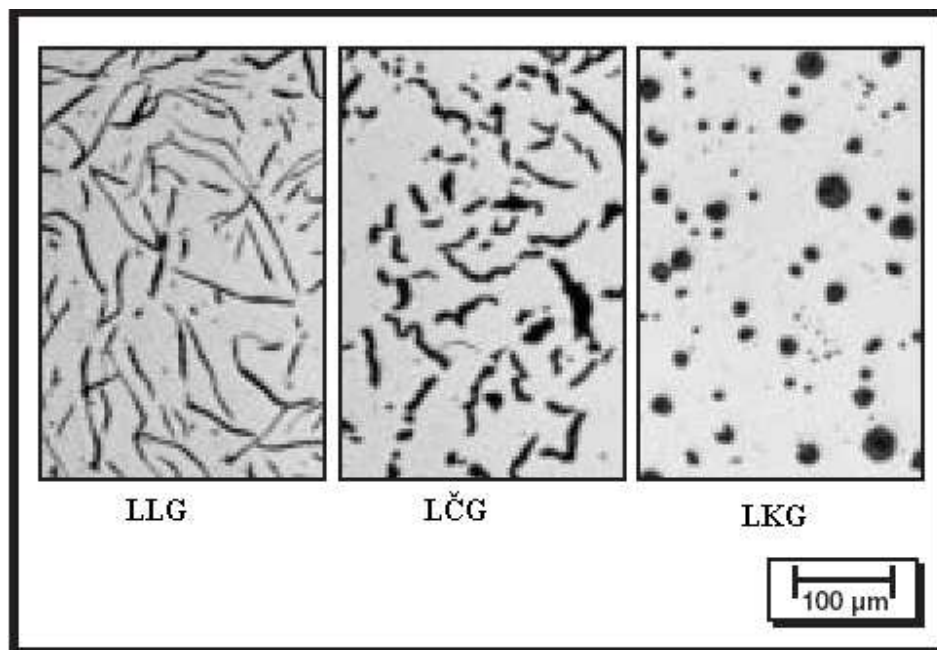
Litiny jsou technické slitiny Fe a C (nad 2,11% C) a dalšími přísadovými prvky, jež tvoří ve struktuře eutektikum. Eutektikum má pro vlastnosti litiny rozhodující význam. Mají obsah C vyšší než je jeho mezní rozpustnost v austenitu za eutektické teploty.

Eutektikum slitiny železa a uhlíku se vytvoří vyloučením grafitu podle stabilní soustavy, nebo vyloučením cementitu podle metastabilní soustavy. Vlastnosti odlitku z grafitické litiny jsou určeny jednak vlastnostmi kovové matrice, jednak tvarem, rozložením a množstvím grafitu, jež je určujícím strukturním znakem pro rozdělení grafitických litin na jednotlivé druhy, protože významným způsobem ovlivňuje jejich vlastnosti.

U stabilního eutektika se může grafit vyloučit jak ve tvaru lupínků, červíků nebo kuliček [4].

Litiny se dělí podle tvaru grafitu na :

- Litina s lupínkovým grafitem (LLG)
- Litina s červíkovým grafitem (LČG)
- Litina s kuličkovým grafitem (LKG)



*Obr. 2.1 Tvar grafitu v litinách – neleptaný stav [10]*

Krystalizace různých druhů litin se může značně lišit. To je vyvoláno vlivem dalších doprovodných prvků. Tyto prvky mohou buď tvorbu grafitu urychlit, nebo brzdit [4].

Velký význam u litin mají prvky Si, Mn, P a S.

Přesto, že se z důvodu přítomností eutektika ve struktuře litiny nedají tvářet, jsou významným konstrukčním materiálem, neboť jejich výroba je levná (mají dobrou slévateľnost při poměrně nízkých teplotách lití). Litiny se vyrábí v jednoduchých, převážně kuplových pecích, přetavením slévářenského surového Fe spolu s litinovým a ocelovým odpadem a se struskotvornými přísadami.

## **2.2 PŘEHLED VLASTNOSTÍ ZÁKLADNÍCH DRUHŮ GRAFITICKÝCH LITIN**

### **2.2.1 Litina s lupínkovým grafitem (LLG)**

Grafit je u LLG vyloučen v podobě prostorových útvarů, které na metalografickém výbrusu mají tvar lupínků. Jejich délka je podstatně větší, než tloušťka, konec lupínků je ostrý. Tyto lupínky značně snižují pevnost litiny [5]. Každá částice grafitu narušuje základní kovovou hmotu a působí jako místní koncentrátor napětí.

Na mechanické vlastnosti má nejvýznamnější vliv struktura základní hmoty, tvar, velikost a rozložení grafitu. Pro většinu účelů je požadována LLG s perlitickou základní hmotou. S menším obsahem perlitu v základní hmotě klesá pevnost a tvrdost litiny.

U litin s lupínkovým grafitem se mez pevnosti v tahu  $R_m$  pohybuje v rozmezí 100 až 350 MPa. Pro mez pevnosti v ohybu platí, že  $R_{m0}$  je  $(1,5 \text{ až } 2)R_m$ . Má prakticky nulovou tažnost, tvařitelnost a rázovou houževnatost. Tvrdost litin s lupínkovým grafitem je 180 až 270 HB. Pevnost v tlaku je asi trojnásobek pevnosti v tahu, mez únavy je  $\sigma_c = 0,3R_m$ . Modul pružnosti  $E$  se obvykle pohybuje v rozmezí  $6 \times 10^4$  až  $16 \times 10^4$  MPa. Nejdůležitější vlastností LLG je velmi dobrá schopnost útlumu vibrací. Použití jako konstrukčního materiálu v případech značného přetížení a rázového namáhání není přípustné. Má velmi dobré slévárenské vlastnosti, dobrou obrobitelnost, výbornou tepelnou vodivost.

### **2.2.2 Litina s červíkovým grafitem (LČG)**

Červíkový grafit je přechodovým typem mezi grafitem lupínkovým a kuličkovým. Částice grafitu v této litině jsou náhodně orientované a mají podobný tvar grafitu jako u LLG. Jsou ale kratší, silnější a jejich zakončení není ostré, nýbrž zaoblené [5]. Podle tvaru grafitu se vlastnosti této litiny blíží vlastnostem litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem.

U litin s červíkovým grafitem se mez pevnosti v tahu  $R_m$  pohybuje v rozmezí 320 až 550 MPa. Tyto litiny mají velmi malou tažnost  $A_5 = 0,5 - 4,5 \%$ . Tvrdost litin s červíkovým grafitem je 130 až 300 HB.

Litiny s červíkovým grafitem mají uplatnění tam, kde je vhodné využít vlastnosti LČG a LKG současně.

Od LČG se tato litina přebírá zejména dobré slévárenské vlastnosti:

- zabíhavost
- malý sklon ke stahování
- malé smrštění
- tlumící schopnosti.

Od LKG tato litina přebírá zejména dobré mechanické vlastnosti:

- vyšší pevnost
- houževnatost
- odolnost proti cyklickému namáhání
- vyšší žáruvzdornost.

### **2.2.3 Litina s kuličkovým grafitem (LKG)**

Grafitická litina, u níž je po ztuhnutí vyloučen grafit ve tvaru kulových zrn, se nazývá litina s kuličkovým (globulárním) grafitem.

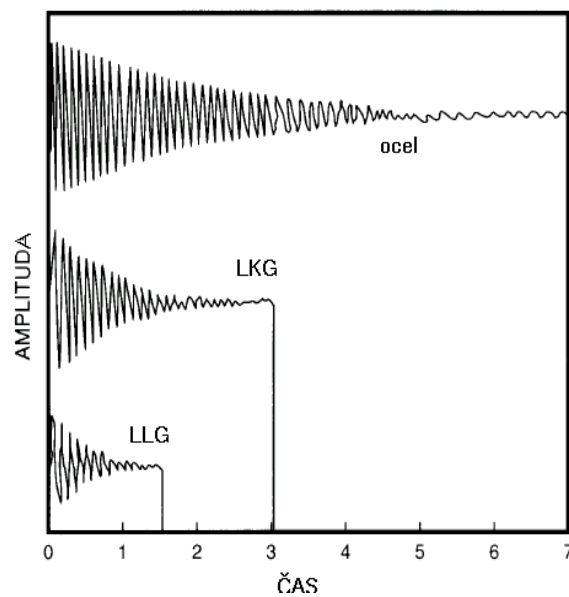
Takto vyloučený grafit nejméně porušuje spojitost matrice. Kulového tvaru grafitu se docílí modifikováním, tj. zpracováním výchozího tekutého kovu modifikačními přísadami, které obsahují složky ovlivňují krystalizaci grafitu ve fázi růstu krystalu tak, že vzniká grafit s různým stupněm globularity .

#### **2.2.3.1 Mechanické vlastnosti LKG**

Litiny s kuličkovým grafitem se vyznačují pevností v tahu 380 - 700 MPa a tvrdostí podle Brinella v celkové rozmezí 140 – 300 HB [7].

Litina s kuličkovým grafitem může mít matici perlitickou nebo feritickou. Perlit převládá ve stavu po odlití, tato litina se vyznačuje vyšší pevností v tahu (500 až 650 MPa), menší tažností (3 až 5 %) a tvrdostí 230 až 280 HB.

Podíl feritu lze zvýšit přidáním Si a snížením obsahu Mn. Tato litina s kuličkovým grafitem má nižší pevnosti v tahu (400 až 500 MPa) a podstatně vyšší tažnosti (5 až 15 %). Modul pružnosti u této litiny se pohybuje v mezích 160 000 až 180 000 MPa. Schopnost útlumu je menší a vrubová citlivost při únavovém namáhání je větší než u LLG.



Obr.2.2: Srovnání tlumících vlastností oceli, LKG a LLG [8]

Litina s kuličkovým grafitem bývá většinou eutektická, někdy i nadeutektická. Její chemické složení se nachází obvykle v intervalech viz. Tab. 2.1.

Tab. č. 2.1 Chemické složení LKG [9]

Prvek	Rozmezí chemického složení
<b>C</b>	3.2 až 4.0
<b>Si</b>	1.5 až 4.0
<b>Mn</b>	0.4 až 0.8
<b>P</b>	max. 0.1
<b>S</b>	max. 0.05
<b>Mg</b>	0.05 až 0.10

#### 2.2.3.2 Slévárenské vlastnosti LKG

Slévárenské vlastnosti LKG mají velký praktický a teoretický význam při výrobě kvalitních odlitků, protože technologie výroby odlitků z LKG je složitější, než z LLG.

#### **Zabíhavost**

Zabíhavost LKG je velmi dobrá, prakticky stejná jako u LLG, tedy mnohem vyšší než u oceli. Nejlepší zabíhavost má LKG při stupni eutektičnosti:

$$S_c = 0,95 - 1,1$$

Při nižším  $S_c$  je zabíhavost horší, avšak vždy lepší než u oceli.

Zabíhavost všeobecně závisí na [1] :

- lící teplotě
- složení slitiny
- technologii výroby formy

### **Smršťování LKG**

Smršťování LKG má výrazně jiný průběh než u jiných druhů litin. Z hlediska objemových změn lze průběh tuhnutí rozdělit do etap:

- primární smršťování
- grafitická expanze
- sekundární smršťování

Z hlediska vnitřní homogenity by se měl grafit vylučovat co možná stejnoměrně, aby sekundární stahování bylo co nejmenší.

Pro dosažení malého smršťování je nutné [3]:

- zajistit minimální obsah karbidotvorných prvků (Mn,Cr) a segregujících prvků (P,S)
- modifikaci a očkování provádět tak, aby vznikl jemný grafit, bez podílu karbidotvorných složek
- teplotu přehřívání a udržování kovu nepoužívat vyšší než 1500 °C , max. 1520 °C
- zbytkový obsah hořčíku udržovat na spodní hodnotě ( $Mg_{zbyt} = 0,04 \%$ ).

### **2.3 Vliv přísadových prvků na vlastnosti LKG**

Přísadové prvky se dělí na legující, tj. žádoucí, které přidáváme pro zlepšení vlastností výsledného materiálu a na nečistoty, jejichž obsah se snažíme eliminovat.

**Uhlík** - výrazně ovlivňuje vlastnosti železa a je přítomen jako intersticiální přísada. V případě vyšší koncentrace uhlíku, než je jeho rozpustnost v tuhém roztoku, tvoří se železem intersticiální chemickou sloučeninu - karbid železa  $Fe_3C$  nebo je chemicky volný a ve struktuře přítomen jako grafit. Ten krystalizuje v šesterečné soustavě. Grafit kompenzuje stahování, ke kterému dochází při tuhnutí odlitku. Čím více uhlíku je vyloučeno jako grafit, tím je celkové stažení

litiny při tuhnutí odlitku menší. Tento fakt umožňuje omezit nálitkování litin. Při vyšším obsahu uhlíku způsobuje zhrubnutí grafitu. Tvrdost a pevnost grafitu jsou nízké. Grafit má také dobré útlumové vlastnosti.

**Křemík** - je po uhlíku nejdůležitější přísada v litinách. Je to nekarbidotvorný prvek, který při tuhnutí výrazně podporuje grafitizaci, při eutektoidní přeměně podporuje vznik feritu [5]. Zlepšuje slévárenské vlastnosti, neboť snižuje teplotu tání litiny a zvyšuje tekutost, avšak zvětšuje sklon k tvorbě trhlin. Navíc přítomnost Si zvyšuje pevnost matrice.

Si ovlivňuje i nukleaci v bainitické oblasti, kde působí na velikost zárodků redistribucí uhlíku během inkubační doby. S jeho zvyšujícím se obsahem klesá rozpustnost C v austenitu.

**Hořčík** - podporuje vznik jemného grafitu. Používá se v malém množství jako přísada do litiny s kuličkovým grafitem při modifikaci, v podobě předslitin Ni-Mg, Cu-Mg i Al-Mg, které se vpraví do dostatečně přehřáté taveniny.

**Mangan** - zvětšuje stabilitu cementitu (karbidotvorná přísada), protože má větší afinitu k uhlíku než Fe. V litinách potlačuje tvorbu grafitu. Mn má tendenci snižovat kritickou teplotu. Významný je vliv manganu při eutektoidní transformaci. Mangan stabilizuje perlit (zejména u litiny s kuličkovým grafitem), zjemňuje perlit, zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost proti otěru [5].

Váže na sebe síru v MnS a tím odsiřuje litinu. Při odlévání zvyšuje tekutost a zlepšuje homogenitu odlitku. Jeho přebytek však zvyšuje tvrdost a křehkost litin. Naznačený vliv Mn souvisí zejména s jeho nerovnoměrným rozložením v matici litiny, neboť se soustřeďuje v průběhu krystalizace ve zbylé tavenině, a proto se po ztuhnutí nachází jeho zvýšená koncentrace v hraničních oblastech eutektika.



**Fosfor** - stabilizuje cementit, zvětšuje interval tuhnutí a zlepšuje tekutost. Fosfor zvyšuje odolnost proti opotřebení, tvrdost a křehkost. Zhoršuje obrobitelnost snižuje odolnost proti dynamickému namáhání a proti teplotním změnám. Snižuje koncentraci uhlíku v eutektickém bodě. Vytváří se jako samostatná strukturní součást, fosfid železa  $\text{Fe}_3\text{P}$ , který je součástí ternárního eutektika.

**Měď** - mírně podporuje grafitizaci. V množství 0,5-1,5 % se používá pro stabilizaci perlitu, zvyšuje mechanické vlastnosti a tvrdost litiny. Zejména u litiny s kuličkovým grafitem se měď s výhodou kombinuje s chromem, obvykle v poměru  $\text{Cu}:\text{Cr} = 4:1$ , kdy se dosahuje perlitické struktury s jemným grafitem a vysokými mechanickými vlastnostmi [5].

**Síra** - stabilizuje cementit, zvětšuje smrštění a zhoršuje homogenitu odlitku. Zvyšuje tvrdost a křehkost, způsobuje v litinách lámavost za tepla a proto se snažíme o její eliminaci. Nepříznivý vliv síry lze kompenzovat její vazbou na  $\text{MnS}$ .

**Dusík** - do obsahu asi 0,02 % N působí perlitotvorně, zjemňuje grafit a tím příznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti. Při vyšším obsahu však podporuje vznik nitridů a může být příčinou bublinatosti odlitků.

**Kyslík** - je v litinách rozpuštěn do obsahu kolem 0,01% O. Kyslík je nezbytný pro tvorbu oxidických zárodků. Jeho obsah a tedy i sklon litiny ke grafitizaci jsou do značné míry závislé na způsobu tavení. Z tohoto důvodu mívají litiny tavené v kuplovnách obvykle lepší grafitizační schopnost než při tavení v indukčních pecích.

**Vodík** - podporuje vznik hrubého grafitu. Při vyšším obsahu podporuje vznik pórovitosti litiny.

## **2.4 TAVENÍ LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM**

### **2.4.1 Vsázkové suroviny**

Pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem je nutno používat velmi čisté suroviny s nízkým obsahem nečistot, síry, fosforu a karbidotvorných prvků. Nároky na kvalitu surovin jsou značně přísnější, než pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem.

Surové železo - pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem se používají vysokopecní surová železa s vyšší čistotou, nebo surová železa vyrobená speciálními rafinačními postupy [5]. Běžné typy surových želez, používaných pro výrobu LLG mají vyšší obsah Mn a P, který zapříčiňuje tvorbu karbidů.

Ocelový odpad - se musí přidávat do vsázky se značnou opatrností, je nutné aby ocelový odpad byl pečlivě tříděn, protože by mohlo dojít k vnášení škodlivých stopových prvků a plynů do vsázky. U ocelového odpadu je nutno věnovat zvýšenou pozornost přítomnosti manganu a karbidotvorných prvků.

Vratný materiál - je nutno používat ve stejné sortě jako je vyráběná litina. Ve slévárnách, které se zabývají výrobou různých typů litin je nutné, aby do tvárné litiny nebyl přidán jiný vratný materiál. Stejně tak je nutno třídit vratný materiál LKG různých značek, které se liší zejména obsahem karbidotvorných prvků.

Litinový odpad – a též i litinové třísky se vzhledem k nejistému složení obvykle nepoužívají.

### **2.4.2 Předled tavících agregátů**

Jak z výše uvedeného vyplývá, litina s červíkovým grafitem se hodně podobá litině s kuličkovým grafitem. To platí i o její výrobě. Názory na tavící (primární) zařízení se v různé literatuře liší.

#### 2.4.2.1 Kuplovna

Patří mezi základní typ šachtových pecí. Je určena především pro přípravu taveniny pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem. V našich podmínkách jsou kuplovny opatřeny kyselou vyzdívkou, která neumožňuje snížení síry a fosforu v litině. Kuplovna má i řadu výhod - plynulou dodávku kovu s nepřetržitým provozním cyklem, jednoduchost vlastního pochodu, vysoké tavící výkony, investičně méně náročnou konstrukci [4].

Z hlediska obsahu síry je příznivá zásaditá struska a proto je nutné, aby kuplovna měla zásaditou vyzdívku. Jejími hlavními nevýhodami jsou nízká odpichová teplota a vysoký obsah uhlíku.

Kuplovny rozlišujeme podle různých hledisek, podle předehřevu dmýchaného větru na studenovětrnou a horkovětrnou.

a) studenovětrná kuplovna - 30 % z celkově vneseného tepla přechází do litiny. Z tepelných ztrát připadá největší podíl na energii odpadových plynů.

b) horkovětrná kuplovna je vybavena rekuperátorem na zužitkování spalin zvyšujícím využití tepla v litině na 43 %. Má nižší množství potřebného koksu. Horkovětrné kuplovny umožňují navíc používat méně jakostní kovovou vsázku. Mají vyšší investiční náklady než studenovětrné kuplovny a zařízení nutné k potlačení vzniku exhalací, proto jsou méně rozšířené než studenovětrné kuplovny .

#### 2.4.2.2 Elektrické obloukové pece

Tyto pece jsou ve slévárnách litiny spíše výjimečné, většinou jsou pozůstatky po přechodu výrobního programu z oceli na litinu. Umožňují přesnou rafinaci taveniny s nižším obsahem nečistot a plynů. V tomto případě poskytují tavenině prvotřídní metalurgické kvality. Také nabízejí výborné řízení teploty, operační flexibilitu a spolehlivost. Hlavní nevýhody jsou vysoké udržovací náklady a náklady na žáruvzdornou vyzdívku.

#### 2.4.2.3 Elektrické indukční pece

Jsou nejčastěji používaným tavicím zařízením pro výrobu litin s kuličkovým grafitem [5].

Příprava taveniny v elektrické indukční peci je čistá, jednoduchá a spolehlivá. K tavení litin v elektrických pecích se většinou používají kelímkové středo-frekvenční pece. Nabízejí vysokou flexibilitu tavicího procesu, možnost použít levnou kovovou vsázku, řídit a kontrolovat velmi přesně chod tavení.

Mají vysoké provozní náklady na energii proti kuplovnám, vysoké investiční náklady a relativně malý specifický tavicí výkon.

Často se používají pro duplexní tavení, kdy se litina nataví v kuplovně (ekonomický provoz) a v indukční peci se upraví chemické složení.

Kanálkové indukční pece přirozeně vyžadují během životnosti vyzdívky určitý zbytkový objem taveniny. Převážně se používají jako udržovací pece pro taveninu z kuploven.

#### 2.4.2.4 Rotační bubnové pece

Využívají energii v podobě spalování zemního plynu a jsou vybaveny dokonalým řízením.

Tepelná účinnost je u rotačních bubnových pecí nejvyšší ze všech tavicích agregátů, protože tepelné ztráty sáláním jsou minimální. Navíc plnění emisních limitů znečišťujících látek nečiní potíže.

Atmosféra působí na taveninu oxidačně, což vede ke ztrátám uhlíku, který se musí dodávat nahličovadlem do vsázky. Hlavní výhodou těchto pecí jsou nízké investiční náklady.

## 2.5 KRYSTALIZACE LITIN

Tuhnutí litin probíhá ve dvou různých soustavách (krystalizace primární fáze a krystalizaci eutektika). Každý z těchto krystalizačních dějů je zahájen nukleací příslušné fáze a jejím následným růstem [5].

### 2.5.1 Nukleace zárodků

Nukleace je tvoření stabilních zárodků, na nichž může pokračovat růst nové fáze. Při dostatečném přechlazení dochází k nukleaci vlastních stabilních zárodků. Tento pochod nazýváme homogenní nukleace, nebo dochází k nukleaci na zárodcích cizích - heterogenní nukleace.

Většinou dochází k nukleaci heterogenní, protože homogenní nukleace je jev velmi energeticky náročný a může k ní docházet pouze při velkém přechlazení.

### 2.5.2 Růst fází

Růst zárodků je druhým stadiem procesu tuhnutí. Dochází k transportu atomů z tekuté do tuhé fáze přes mezifázové rozhraní.

Rozlišují se dva druhy rozhraní mezi tuhou a tekutou fází:

*Atomicky hladké rozhraní* - tohoto typu rozhraní vznikají vrstvy složek fáze s vysokou entropií, které jsou energeticky náročné, protože pro vytvoření další vrstvy je nutný nový proces nukleace. Takto převážně krystalizuje grafit.

*Atomicky hrubé rozhraní* - u tohoto typu rozhraní vzniká fáze při menším přechlazení, protože složky mají nízkou entropii. Takto převážně krystalizuje austenit.

### 2.5.3 Vznik primárního austenitu.

Jako zárodky mohou sloužit částice formovací směsi a oxidy, karbidy nebo nitridy prvků přítomných v litině [5].

Titan a vanad podporují nukleaci dendritů.

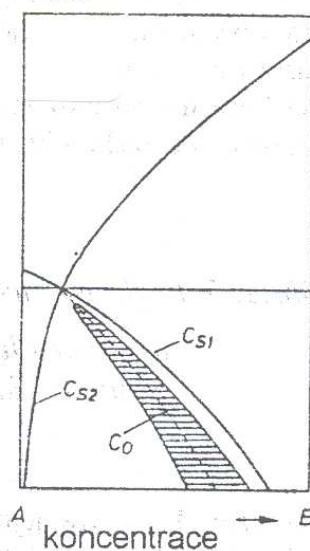
Rychlost ochlazování, segregace a difúze prvků určují růst dendritů. Čím je rychlost ochlazování větší, tím je menší poloměr zaoblení (špičatější vrchol dendritu) a jemnozrnnější struktura.

### 2.5.4 Krystalizace eutektika

Pod rovnovážnou eutektickou teplotu v koncentrační oblasti dochází ke krystalizaci eutektika.

Tato oblast se nazývá oblast kooperativního růstu eutektika. Oblast kooperativního růstu eutektika je definována jako rozmezí teplot a koncentrací, v němž je v binárním systému možný společný stabilní růst dvou eutektických fází stejnou rychlostí [5].

U slitiny Fe-C jsou teploty tuhnutí obou složek značně rozdílné a proto je tvar oblasti kooperativního růstu eutektika asymetrický a posunut směrem ke složce s vyšší teplotou tuhnutí.



Obr. 2.3 Oblast krystalizace eutektika

U litiny s kuličkovým grafitem roste grafit menší rychlostí než austenit. Obě rychlosti růstu austenitu a grafitu nemají společný průsečík, proto nemůžou obě fáze růst společně.

Kolem grafitu je vytvořena obálka v důsledku rychlejšího růstu austenitu. Přes obálku austenitu dochází k difúzi uhlíku, která zapříčiňuje další růst grafitových částic.

U litin se tvoří tzv. anomální eutektikum, které je zapříčiněno odlišnými mřížkami grafitu a železa. Vedoucí složkou eutektické krystalizace je grafit, protože má vyšší teplotou tuhnutí.

#### 2.5.4.1 Nukleace grafitu

Nukleace grafitu je základním aspektem ovlivňujícím krystalizaci grafitických litin. Grafit by měl být vyloučen v celém průřezu odlitku rovnoměrně a pokud možno ve stejně velkých útvarech. Při nevhodném rozložení grafitických zárodků vznikají nežádoucí typy grafitických částic, které mají negativní vliv na kvalitu litiny.

Grafitizační zárodky musí splňovat tyto požadavky [5]:

- a) Při teplotě tuhnutí litiny jsou v tuhém stavu a v tavenině jsou nerozpustné.
- b) Mají mikroskopickou velikost (obvykle kolem 1  $\mu\text{m}$  a menší), pokud možno se neshlukují, nevyplovávají a v tavenině jsou velmi rovnoměrně rozložené.
- c) Krystalizační účinek působí na žádoucí fázi (grafit, nikoliv cementit). K tomu je nutné, aby krystalická mřížka zárodku byla stejného typu jako grafitu.

#### 2.5.4.2 Růst eutektika s kuličkovým grafitem

Po modifikaci litiny globulizačními prvky dochází k růstu kuličkového grafitu. Jako modifikační prvek se používá hořčík, případně společně s cerem a dalšími kovy vzácných zemin.

Kyslík a síru na sebe chemicky váží globulizační prvky, protože k těmto prvkům mají vysokou afinitu. Při nižším obsahu O a S způsobí tyto prvky zvýšení povrchového napětí a tím dojde ke zhoršení podmínek pro růst grafitu.

Růst grafitu probíhá difúzí uhlíku přes obálku austenitu. Částice grafitu je uzavřena v obálce austenitu z důvodu vyšší rychlosti růstu austenitu. V důsledku koncentračního spádu v austenitové obálce při ochlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou dochází k difúzi uhlíku a dalšímu růstu grafitu.

## 2.6 MODIFIKACE A OČKOVÁNÍ

### 2.6.1 **Modifikace Mg**

Teplota vypařování Mg je  $1102^{\circ}\text{C}$ , jeho molární hmotnost je  $1740\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a při teplotách zpracování litiny  $1400$  až  $1500^{\circ}\text{C}$  je tlak jeho par  $0,6$  až  $1,0\text{ MPa}$ . Modifikace probíhá postupným rozpouštěním hořčíkových par, které probublávají litinou. Dráha hořčíkových bublin by měla být co nejdelší, aby vyplouvání bublin bylo pomalé a klidné [5]. Při modifikaci působí hořčík jako odsiřovadlo a desoxidovadlo.

Modifikace se provádí přímo kovovým Mg nebo předslitinami Mg. Při modifikaci kovovým Mg je nutno brát v úvahu vyšší sklon litiny k tvorbě karbidů a proto se musí více očkovat. Reakce je velmi bouřlivá s velkou ztrátou Mg a spojená s rozstříkáváním roztaveného kovu. Při použití předslitin hořčíku reakce probíhá pomaleji. Snižuje se oxidace hořčíku na hladině a využití hořčíku je poměrně vysoké ( $50 - 70\%$ ).



### 2.6.2 Modifikace kovy vzácných zemin

Kovy vzácných zemin (KVZ) jsou kovy s vysokou elektrickou vodivostí a vysokým leskem. KVZ jsou silnými redukčními činidly a jejich sloučeniny jsou obecně vázány iontovou vazbou. Většina KVZ je trojmocných. Nejreaktivnějšími kovy z KVZ jsou europium a céry. KVZ na vzduchu velmi rychle reagují s kyslíkem za vzniku oxidů. Za zvýšených teplot u některých může dojít k samovznícení a intenzivnímu hoření. Promethium a thorium jsou radioaktivní. Modifikace KVZ je dražší než modifikace Mg. V tabulce 2.2 jsou uvedeny některé fyzikální a chemické vlastnosti KVZ.

Výhodou KVZ je, že teplota varu je vyšší, než teploty při modifikaci litiny. Z toho plyne, že průběh reakce je klidný a zpracování nevyžaduje speciální postupy a zařízení.

Tab. 2.2 Fyzikální a chemické vlastnosti některých KVZ [8]

Prvek	Značka	Atomové číslo	Atomová hmotnost	Hustota [kg/dm <sup>3</sup> ]	Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]
Lanthanum	La	57	138,90	6,15	918	3464
Cerium	Ce	58	140,12	6,77	789	3443
Praseodymium	Pr	59	140,98	6,44	931	3520
Neodymium	Nd	60	144,24	7,01	1021	3074
Promethium	Pm	61	145,00	7,26	1042	3000
Samarium	Sm	62	150,40	7,52	1074	1794
Europium	Eu	63	151,96	5,20	822	1527
Gadolinium	Gd	64	157,25	7,90	1313	3273
Terbium	Tb	65	158,93	8,23	1356	3230
Dysprosium	Dy	66	162,50	8,55	1412	2567
Holmium	Ho	67	164,93	8,80	1474	2700
Erbium	Er	68	167,26	9,10	1529	2868
Thulium	Tm	69	168,93	9,34	1545	1950
Ytterbium	Yb	70	173,04	7,00	819	1196
Lutetium	Lu	71	174,97	9,84	1663	3402
Scandium	Sc	21	44,96	3,00	1541	2836
Yttrium	Y	39	88,91	4,47	1522	3338
Thorium	Th	90	232,04	11,80	1750	4850

### 2.6.3 Očkování

Z důvodu, že prvky používané k modifikaci grafitu u LKG podporují tvorbu karbidů, je nutné provádět grafitizační očkování. Očkování je v podstatě přidání zárodků do taveniny, ze kterých roste pevná fáze během tuhnutí. V některých případech tyto zárodky vzniknou přidáním drobných částic stejné fáze, která tuhne. Tyto drobné částice se během tavení zcela nerozpustí a poskytují vhodná místa pro růst zrna. V jiných případech mohou stejným způsobem působit částice jiného materiálu, než který tuhne [3].

Očkování je posledním krokem v procesu LKG.

Pro očkování litin s kuličkovým grafitem se používá převážně FeSi s obsahem Si 60 – 75 % [5]. Množství očkovadla závisí na tloušťce stěn odlitku. Pro silnostěnné odlitky se používá méně očkovadla.

Očkovadlo může obsahovat C, Ba, Mg, Mn a Zr, které slouží pro zvýšení rozpustnosti nebo účinnosti očkovadla.

Důležité je též skladování těchto materiálů. Očkovadla by měla být skladována v uzavřených nádobách, aby byla chráněna před přístupem vzduchu a vlhkostí. Jejich účinnost klesá s časem, kdy nebyla chráněna.

Při jednostupňovém očkování se očkovadlo přidává k modifikátoru. Množství očkovadla musí být poměrně vysoké, protože interval mezi očkováním a litím je dlouhý.

Při dvojestupňovém očkování se očkuje až po modifikaci. Tento způsob očkování lze použít u všech druhů modifikace. Očkuje se těsně před litím. Čím později se očkuje tím je nižší množství očkovadla, protože je vyšší očkovací účinek.

Na očkování po modifikaci taveniny se používají tři metody:

- 1) očkování v pánvi;
- 2) v proudu taveniny během lití;
- 3) ve slévárenské formě.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

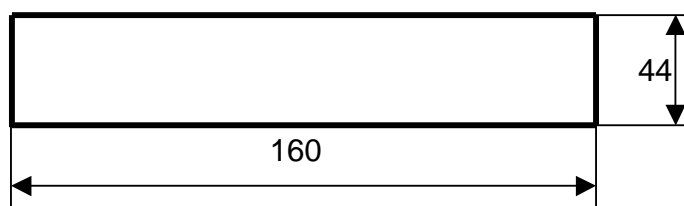
Experimenty prováděné v rámci této práce byly zaměřeny na stanovení metalurgických podmínek při výrobě odlitků jednoduchých tenkých tvarů z litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku.

K tomuto účelu byly navrženy zkušební odlitky tvaru desky s různou tloušťkou, odlévané do formy z bentonitové formovací směsi. Také byla zvolena metodika prováděných experimentů s ohledem na vhodnou volbu jak technologických podmínek přípravy taveniny litiny s kuličkovým grafitem (správné množství vsázkových surovin, teplota taveniny), tak použitého modifikačního a očkovacího činidla. Výsledkem experimentů bylo stanovení souvislosti mezi metalurgickou přípravou taveniny, výslednou mikrostrukturou a tvrdostí zkušebních odlitků.

#### 3.1 POPIS PŘÍPRAVY SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

##### 3.1.1 Odlitek pro zkoumání vhodné struktury LKG

Pro zkoumání vhodné struktury odlitků z LKG byl navržen odlitek ve tvaru obdélníkových destiček s nestejnou tloušťkou. Tloušťky zkušebních těles byly navrženy: 3, 4, 5, 8 a 10 mm. Základní rozměry jsou na obrázku 3.1.

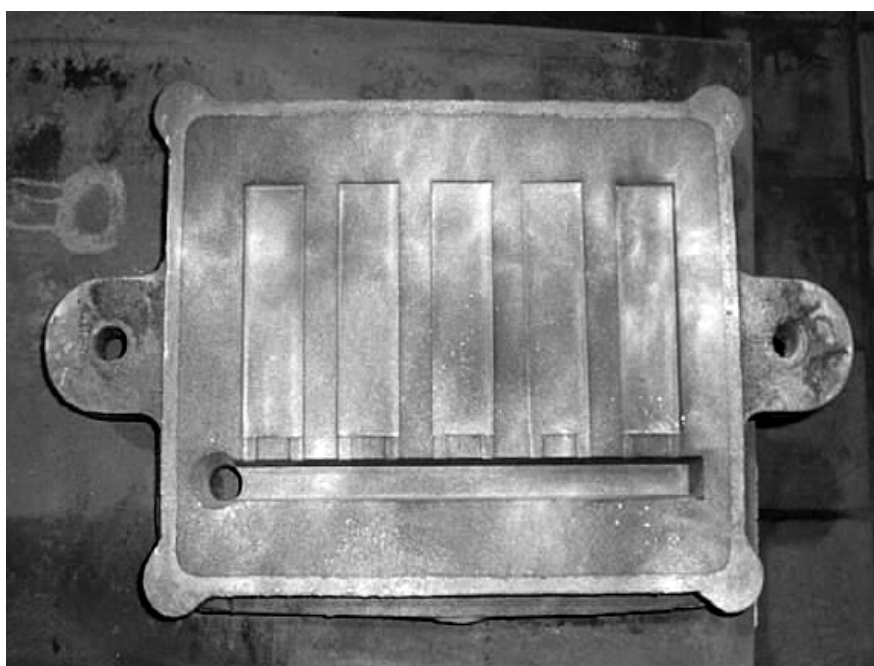


Obr. 3.1 Základní tvar zkušebních těles

Těchto pět odlitků (zkušebních vzorků) bylo připojeno čelní plochou k jednomu struskováku, aby byl využit prostor v rámu, jak je patrné ze surového odlitku, viz obr. 3.2. Pořadí destiček bylo voleno od vtokového kanálu. Nejbližší

byla volena destička o tloušťce 10 mm. Pak následovaly destičky o tloušťkách 3, 4, 5 a 8 mm.

Byl použit rám o rozměrech 400 x 300 x 100 mm, kde byl ručně zaformován kovový model. Spodní rám byl zarovnán formovací směsí a tvořil pouze spodní plochu odlitků. Do vrchního rámu byl zaformován model s vtokovou soustavou a licí jamkou, jak je patrné z obr. 3.2. Před složením rámu byl líc formy postříkán vodným roztokem melasy.



*Obr. 3.2 Pohled na dělicí plochu vrchní části slévárenské formy*

Byla použita bentonitová formovací směs, aby byly splněny běžné podmínky ve slévárenských provozech. Jako ostřívo byl použit křemičitý písek Střeleč T2S. Pojivem byl bentonit Speciál 550 (7 hmot. %). Jako přísada zlepšující vlastnosti formovací směsi byla použita kamenouhelná moučka (1 hmot. %). Formovací směs obsahovala 3 % vody.

Průměrné hodnoty vlastností formovací směsi byly stanoveny z pěti vzorků pro každý materiál, viz tab. 3.1. Zkoušky byly prováděny v laboratoři KSP -TU v Liberci.



*Obr. 3.3 Slévárenská forma připravená k odlévání*

Pevnost formovací směsi byla stanovena na přístroji typu LRu a prodyšnost vzorků na přístroji typu LP. Pro stanovení velikost zrn ostřiva formovací směsi byl použit síťový rozbor.

*Tab. 3.1 Průměrné hodnoty vybraných vlastností použité formovací směsi*

<b>Pevnost v tlaku [MPa]</b>	<b>Prodyšnost [j. p. SI]</b>	<b>d<sub>50</sub> [mm]</b>
0,051	334	0,27

### 3.2 PŘÍPRAVA TAVENINY LKG

#### 3.2.1 **Tavící zařízení a vsázkový materiál**

Na oddělení strojírenské metalurgie Katedry strojírenské technologie TU v Liberci byla připravena tavenina. Pro tavení byla použita elektrická středofrekvenční kelímková indukční pec IO 40 s maximální hmotností nataveného materiálu 40 kg. Vyzdívky pece i odlévací pánve byly kyselé. Pánev byla navržena a vyrobena s ohledem na modifikační komůrku a výška pánve je dvojnásobkem jejího průměru.

Pro všechny tavby byl použit tento vsázkový materiál:

- surové železo SOREL - chemické složení surového železa je v tabulce 3.2.
- grafitizační očkovadlo bylo použito Superseed a FeSi75. Chemické složení očkovadel je v tabulce 3.3.
- modifikační činidlo byla předslitina Cer-Mischmetall (C-MM), chemické složení obsahuje tabulka 3.4. a MgFeSi , jehož chemické složení je v tabulce 3.5.

*Tab. 3.2 Chemické složení surového železa (SOREL)*

Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]
95,48	4,23	0,15	0,013	0,026	0,01	0,007

*Tab. 3.3 Chemické složení očkovadel*

	Fe [%]	Si [%]	Al [%]	Ca [%]	Sr [%]	Mg [%]	KVZ
FeSi 75	25	75	-	-	-	-	-
Superseed	Zbytek	75	max. 0,5	0,1	0,8	-	-

*Tab. 3.4 Chemické složení modifikátoru Cer-Mischmetall*

Ce [%]	La [%]	Nd [%]	Pr [%]	Ost. KVZ [%]	Fe [%]	Si [%]	Mg [%]	Al [%]
50-53	20-26	15-19	4-7	cca 3	cca 0,5	cca 0,3	cca 0,3	cca 0,2

*Tab. 3.5 Chemické složení modifikátoru MgFeSi*

Si [%]	Mg [%]	Ca [%]	KVZ [%]	Al [%]	Fe [%]
45	5	1	1	1	47

### **3.2.2 Vzorky pro stanovení mikrostruktury**

Pro stanovení mikrostruktury litiny byly odlity zkušební tyče o  $\varnothing$  30 mm a délce 115 mm. Forma byla ručně zaformována z formovací směsi - CT . Vzorky byly odlévány ve svislé poloze. Na obr. 3.4 je slévárenská forma pro odlévání zkušebních tyčí.



*Obr. 3.4 Pohled na formu z CT směsi pro odlití zkušebních tyčí*

### **3.2.3 Vzorky pro zjišťování chemického složení**

Vzorky pro zjišťování chemického složení LKG byly (průměru 35 mm a tloušťky 5 mm) s přetoky - tzv. medaile. Odlity byly do měděné kokilky, která zajistí velmi rychlé ztuhnutí odlitku tak, aby uhlík byl vyloučen při metastabilních podmínkách za vzniku ledeburitu, resp.  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Chemické složení litiny bylo určeno pomocí spektrálního kvantometru, který analyzuje množství uhlíku pouze z  $\text{Fe}_3\text{C}$ .



### 3.3 VLASTNÍ PROVÁDĚNÍ EXPERIMENTU

#### 3.3.1 Vedení taveb pro přípravu taveniny LKG

Pro všechny tavby byl použit podobný postup tavení, modifikace i grafitizačního očkování. V peci bylo nataveno příslušné množství základního kovového materiálu. Sorel obsahuje málo křemíku pro výrobu LKG, proto byl jeho obsah zvýšen přidáním příslušného množství FeSi75 (viz *tab. 3.6*). Tato vsázka byla zahřáta na teplotu 1500 až 1530 °C. Při těchto teplotách byla již vsázka kompletně převedena do tekutého stavu. Teplota taveniny byla pečlivě měřena před následujícími kroky pomocí optického pyrometru. Lící pánve byla ohřáta na teplotu cca 600 °C. Tato pánve je současně pánví modifikační a očkovací. Nejdříve bylo do komůrky modifikační pánve vloženo odpovídající množství modifikátoru (viz. *tab. 3.6*) a na toto množství modifikátoru byla dána příslušná dávka očkovadla FeSi75. Poté byla všechna tavenina vlita do pánve. Po dvou minutách, potřebných pro rozpuštění modifikátoru, byla tavenina ještě jednou očkovaná Superseedem (nasypáním na hladinu) a tavenina byla promíchána. Pak byla připravená tavenina s teplotou 1400 °C okamžitě odlévána do výše popsaných forem. Po ztuhnutí a zchladnutí byly odlitky vytlučeny z formy a od vtokové soustavy odděleny jednotlivé zkušební vzorky.

Na *obr. 3. 5* je uveden pohled na surový odlitek, který je tvořený destičkami výše uvedených tloušťek.

*Tab. 3.6 Hmotnostní složení použitých vsázek pro odlévání zkušebních odlitků z LKG*

Tavba	Sorel [kg]	FeSi75 [kg]	Modifikátor		Očkovadlo	
			KVZ [kg]	MgFeSi [kg]	FeSi75 [kg]	Supreseed [kg]
JS1	40	1,200	0,0600	-	0,200	0,300
JS3	25	0,790	0,0300	-	0,120	0,170
JS6	25	0,124	0,0035	0,35	0,225	0,174



Obr. 3.5 Odlitky tvaru desek (160 x 44mm; tl. 3, 4, 5, 8 a 10 mm)  
z LKG

### 3.4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

#### 3.4.1 Měření tvrdosti odlitků

Tvrdot odliťků z LKG byla měřena na Brinellově tvrdoměru firmy Karl Zeiss. Indentorem byla kulička  $\varnothing 5$  mm ze zakalené chromové oceli a zatížená silou 7355 N (750 kp). Ze získaných vtisků příslušných plošek byly naměřeny dva na sebe kolmé průměry. Z těchto dvou hodnot tvrdostí příslušejících ke každému vtisku byla vypočítána střední hodnota průměru vtisku. Ke každé střední hodnotě vtisku byla pomocí tabulek přiřazena výsledná hodnota tvrdosti.

Před měřením tvrdosti byl každý vzorek broušen na měřené ploše tak, aby byla odstraněna licí kůra a povrch měl vyhovující drsnost pro měření, resp.

vyhodnocování průměrů vtisků. Broušení bylo prováděno pomalu, aby nedocházelo k přílišnému zahřátí destičky a k ovlivnění základní kovové hmoty destičky. Samotné broušení bylo prováděno na stolní brusce v dílnách Katedry strojírenské technologie.

Naměřené hodnoty tvrdostí byly statisticky vyhodnoceny podle následujících vztahů:

a) Výběrový aritmetický průměr:

$$x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3 - 1)$$

b) Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (3 - 2)$$

c) Variační koeficient:

$$v = \frac{s}{x} \quad (3 - 3)$$

Tab. 3.6 Tvrdost destiček

TAVBA	Tloušťka destičky [mm]	Tvrdost HB					Výběrový aritmet. průměr	Směrodat. odchylka	Variační koeficient
JS 01	3	352	313	267	224	222	275,6	50,69	0,184
	4	218	220	222	198	211	213,8	8,73	0,041
	5	218	165	182	192	202	191,8	17,92	0,093
	8	186	189	186	192	182	187,0	3,35	0,018
	10	202	189	184	182	176	186,6	8,75	0,047
JS 03	3	422	416	422	422	422	420,8	2,40	0,006
	4	380	385	309	316	316	341,2	33,85	0,099
	5	282	186	148	176	150	188,4	49,05	0,260
	8	214	222	218	189	204	209,4	11,83	0,056
	10	222	211	209	207	211	212,0	5,22	0,025
JS 06	3	219	215	219	204	200	211,4	7,91	0,037
	4	217	239	234	202	200	218,4	15,98	0,073
	5	222	217	222	202	198	212,2	10,21	0,048
	8	198	197	198	201	204	199,6	2,58	0,013
	10	195	197	193	194	191	194,0	2,00	0,010

### 3.4.2 Stanovení chemického složení jednotlivých taveb LKG

Pro zjištění chemického složení byly odlity vzorky („medaile“). Spektrální analýza byla provedena na přístroji LECO RC 4000. V tab. 3.7 je uvedeno zjištěné chemické složení taveb LKG.

Tab. 3.7 Chemické složení destiček

Tavba	Chemické složení [%]				
	C	Mn	Si	P	S
Js1	3,54	0,072	3,01	0,036	0,015
Js3	3,53	0,034	3,38	0,031	0,009
Js6	3,78	-	3,18	0,024	0,011

### 3.4.3 Stanovení mikrostruktury

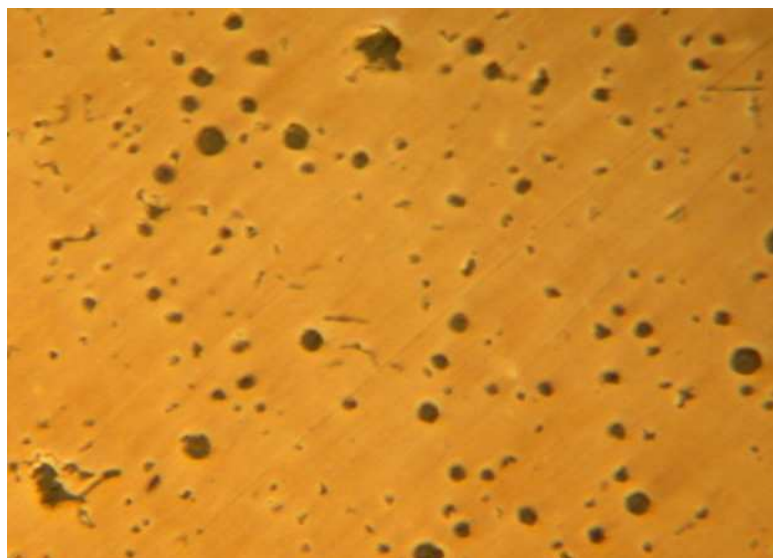
K stanovení mikrostruktury odlitků z LKG byl použit světelný mikroskop NEOPHOT 21 (výrobce SRN). K tomuto účelu byly připraveny vzorky běžným metalografickým způsobem (zalité do dentakrylu, broušeny, leštěny, leptány,

atd.). Vzorky byly odříznuty z tyčí Ø30 x 115 mm ve vzdálenosti 40 mm od spodního okraje. Oddělování vzorků bylo provedeno pomocí rámové pily za stálého chlazení. Vzorky byly dále broušeny pod vodou brusnými papíry různé zrnitosti.

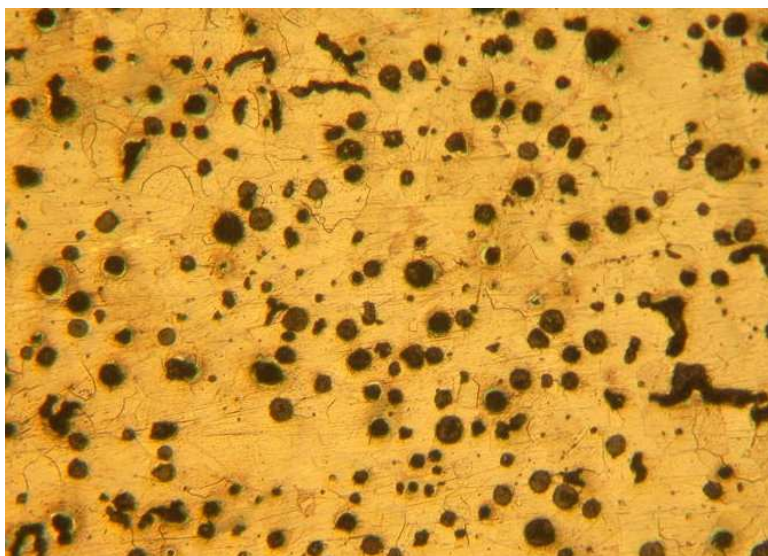
Sledování struktury litiny bylo nejdříve prováděno v neleptaném stavu pro stanovení tvaru a rozložení grafitu při 100 násobném zvětšení.

Vzorky pro pozorování základní kovové hmoty byly sledovány v leptaném stavu při zvětšení 100 násobném. K naleptání byl použit 3 % roztok leptadla NITAL.

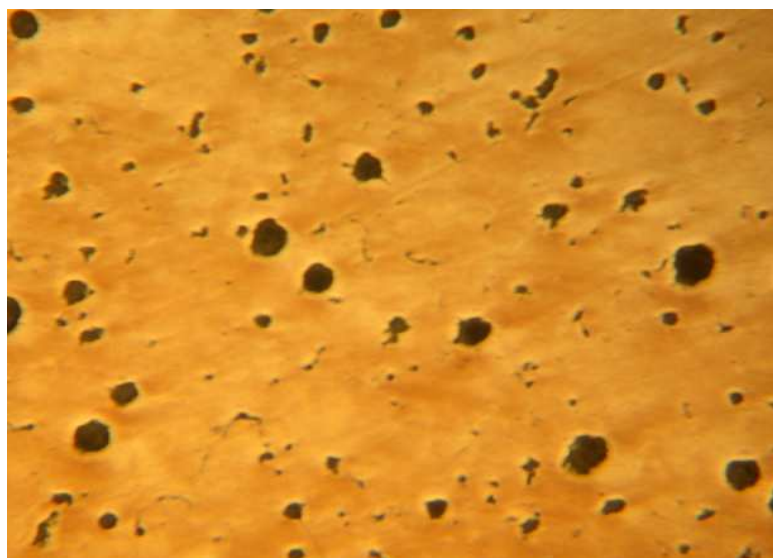
Pro dokumentaci sledované struktury litiny byl použit mikroskop NEOPHOT 21 s digitálním fotoaparátem firmy Nikon. Vybrané struktury jsou uvedeny na obr. 3.6 – 3.11.



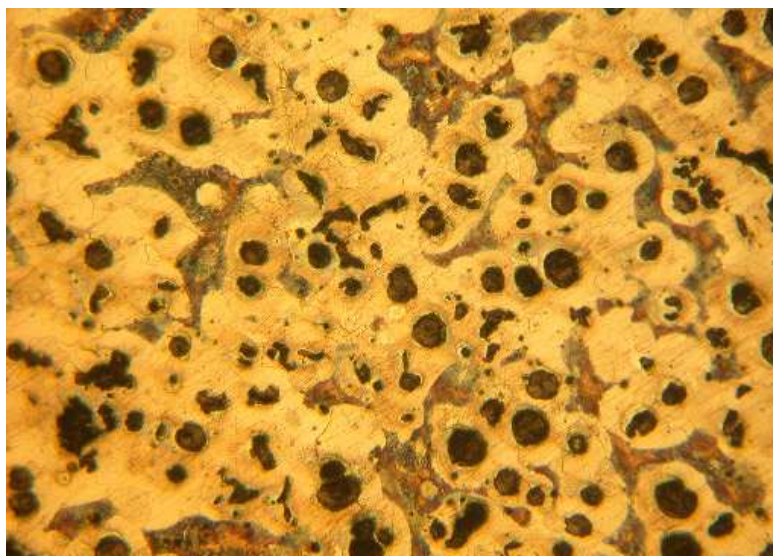
*Obr. 3.6 Mikrostruktura vzorku z tavby Js 01 po modifikaci, zvětšení 100x*



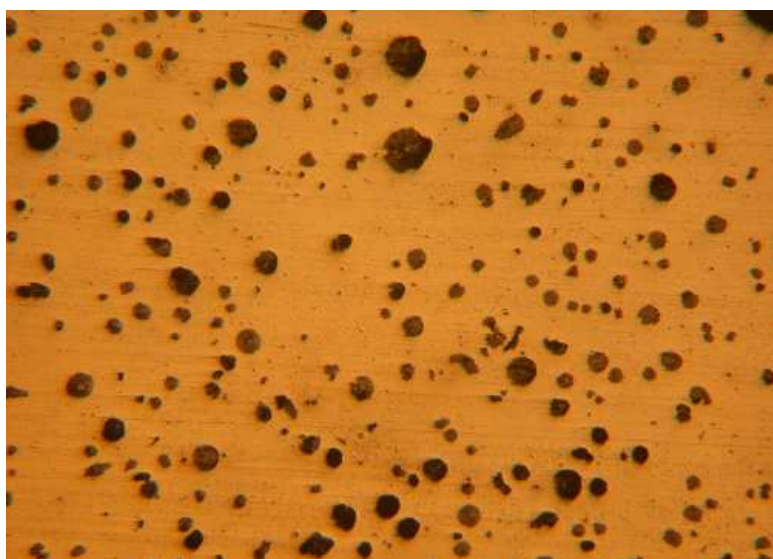
*Obr. 3.7 Mikrostruktura vzorku z tavby Js 01 po modifikaci, zvětšení 100x,  
leptadlo NITAL*



*Obr. 3.8 Mikrostruktura vzorku z tavby Js 03 po modifikaci, zvětšení 100x*

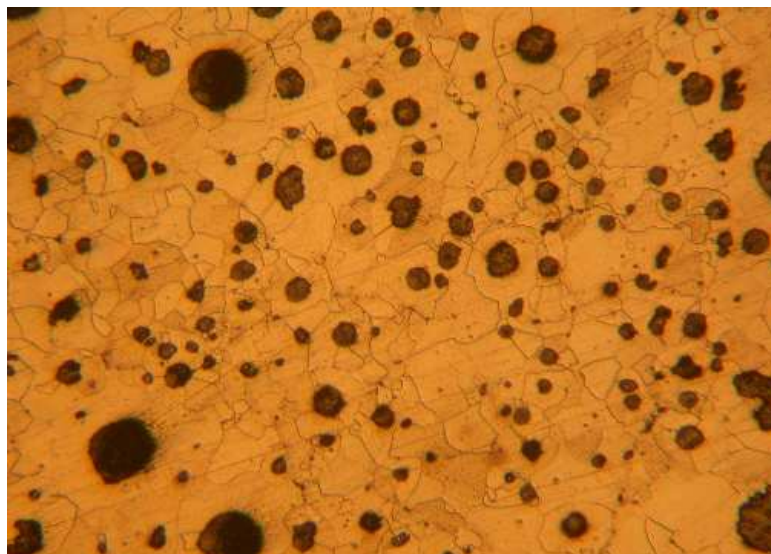


*Obr. 3.9 Mikrostruktura vzorku z tavby Js 03 po modifikaci, zvětšení 100x, leptadlo NITAL*



*Obr. 3.10 Mikrostruktura vzorku z tavby Js 06 po modifikaci, zvětšení 100x*





*Obr. 3.11 Mikrostruktura vzorku z tavby Js 06 po modifikaci, zvětšení 100x, leptadlo NITAL*

#### **4. DISKUSE VÝSLEDKŮ**

Experimenty prováděné v rámci této bakalářské práce přinesly další informace o výrobě tenkostěnných odlitků (o tloušťce 3 až 10 mm) z litiny s kuličkovým grafitem o vyšším obsahu křemíku cca okolo 3%. Tato litina je v současné době na základě příznivých výsledků některých evropských sléváren odlitků pro automobilový průmysl velmi presentovaná Mezinárodní komisí WFO – pro litinu s kuličkovým grafitem. Uplatnění této litiny je např. při výrobě části přední nápravy nákladních automobilů, atd.

V této bakalářské práci byly na jedné straně potvrzeny již známé poznatky o metalurgické přípravě taveniny LKG a současně byly získány nové poznatky, které se týkají zejména technologických postupů při přípravě taveniny výrobě zkušebních odlitků s vyšším obsahem křemíku.

V této souvislosti je nutno připomenout, že jsem prostudoval pro zdárný průběh experimentů této bakalářské práce velké množství odborné literatury, která mě usnadnila volbu technologických parametrů.



Z hodnot naměřených tvrdostí je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou zkušebních destiček klesá jejich tvrdost. Dále se potvrdila závislost mezi chemickým složením, resp. přípravou taveniny a tvrdostí odlitku.

Ze získaných výsledků je patrné, že nelze ihned přesně stanovit všechny zásady přípravy taveniny, tak aby vedly k docílení předpokládaných příznivých výsledků. Proto bylo nutno postupně zpřesňovat množství jednotlivých vsázkových surovin a současně k nim přiřazovat určitá množství křemíku. Ze srovnání taveb je patrné, že tavba Js 03 měla velké množství křemíku (3,38%) a menší množství manganu (0,034%). Tyto prvky způsobily přítomnost perlitu ve struktuře, jak je patrné z obr. 3.9 a velkou tvrdost destiček. Největší homogenita tvrdostí byla naměřena u tavby Js 06 což byl jeden z dílčích úkolů, kterého se mělo dosáhnout. Z výsledků této tavby vyplývá, že byla nalezena potřebná souvislost v zastoupení jednotlivých vsázkových složek a také byla správně provedena modifikace a očkování taveniny.

U taveb Js 01 a Js 03 byl tvar grafitu smíšený (kuličkový a červíkový), který je nevyhovující. Tavba Js 06 měla kuličkový tvar grafitu, který se povedlo získat přidáním většího množství modifikátoru  $\text{MgFeSi}$  (0,35 kg) a nižším množstvím modifikátoru Cer-Mischmetall (0,0035 kg).

U tavby Js 01 a Js 06 je kovová matrice feritická, které též odpovídá naměřená tvrdost. Tato tvrdost je logicky nižší než byla zjištěna u tavby, která vykazovala feriticko-perlitickou matici.

## 5. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo shrnout a potvrdit všeobecné požadavky na výrobu odlitků z litiny s kuličkovým grafitem.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou základních částí: rešeršní a experimentální. V části rešeršní bylo provedeno ucelené shrnutí poznatků o přípravě a výrobě litiny s kuličkovým grafitem. Z průzkumu literatury je patrná snaha technických pracovníků, najít vhodné materiály pro splnění stále náročnějších požadavků na odlitky, jakým litina s kuličkovým grafitem bezesporu je.

V hlavní části (experimentální) - byla provedena řada experimentů přípravy taveniny a její odlití pro výrobu odlitků tvarů desek (160 x 44 mm; tl.: 3, 4, 5, 8, 10 mm).

Cílem experimentální části práce bylo zjištění praktického chování LKG při lití. Z experimentů prováděných v rámci této diplomové práce je možno stanovit několik základních dílčích závěrů:

1. Pro výrobu tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem je důležité volit vhodné vsázkové suroviny a je třeba dodržet správný poměr jednotlivých komponent.
2. Správnou volbu formovací směsi pro výrobu forem a zaformování modelu. Současně dbát i na konstrukci forem z hlediska tepelných poměrů ve formě.
3. Vhodně navrhnout a dodržet technologický režim tavení, modifikace a očkování taveniny včetně správné teploty modifikace a očkování .
4. Správné použití modifikačního a odlévacího zařízení (výška je dvojnásobkem průměru), správná teplota přehřevu na cca 600 °C a manipulace po jejím naplnění taveninou.

5. K získání LKG s feritickou matricí, bylo nejdříve přidáno k sorelu 0,124 kg FeSi75 pro zvýšení obsahu křemíku. Před vlitím taveniny do pánve bylo do modifikační komůrky vloženo 0,35 kg modifikátoru MgFeSi a 0,0035 kg modifikátoru Cer-Mischmetall. Na toto množství modifikátoru bylo dáno 0,225 kg očkovačla FeSi75. Poté byla všechna tavenina vlita do pánve. Po dvou minutách, potřebných pro rozpuštění modifikátoru, byla tavenina ještě jednou očkována 0,174 kg Superseedu (nasypáním na hladinu) a tavenina byla promíchána. Následně byla tavenina vlita do příslušných forem.

U provedených experimentů bylo možné vyzorovat vysokou citlivost litiny na přidávané množství modifikátoru a grafitizačního očkovačla.

## 6. LITERATURA

- [1] DUNG, N.: Výroba tvárné litiny metodou Kontinuální modifikace (Disertační práce) Ostrava 1992
- [2] HANZL, S. ;Růžička, A.:Metalurgie a technologie slévárenských slitin ČVUT 1991
- [3] KARSAY, S.I: Tvárná litina I. Výroba. QIT-FER ET TITANE INC, Fompex, s.r.o., Trenčín, 1996.
- [4] PLACÝ, J.; NĚMEC, M.: Metalurgie a technologie slévárenských slitin ČVUT 1993
- [5] ROUČKA, J.: Metalurgie litin. [Skripta]. VUT Brno, 1998
- [6] SÝKORA, P.: Tvárná litina , Technické informace Praha, 1982
- [7] VÁVRA, P.: Strojnické tabulky SNTL 1983
- [8] KOSEK, P.: Vliv KVZ na aktivitu kyslíku a efektivnost modifikace u grafitických litin. (Diplomová práce). FS -TU Liberec, 2003
- [9] DORAZIL, E.: Nauka o materiálu VUT Brno 1989
- [10] ŠMRHA, J.: Zásady výroby tenkostěnných odlitků z litiny s červíkovým grafitem pro automobilový průmysl (Diplomová práce) TU-Liberec, 2004

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

26. 5. 2006

.....

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

26. 5. 2006

.....